PRINCIPIOS BASICOS

1.3 FUERZAS QUE ACTÚAN EN VUELO.

Sobre un aeroplano en vuelo actúan una serie de fuerzas, favorables unas y desfavorables otras, siendo una tarea primordial del piloto ejercer control sobre ellas para mantener un vuelo seguro y eficiente.
Aunque los expertos siguen debatiendo e investigando sobre aerodinámica, a nuestro nivel solo necesitamos conocer algunos conceptos fundamentales, empezando por las fuerzas que afectan al vuelo y sus efectos.

De todas las fuerzas que actúan sobre un aeroplano en vuelo, las básicas y principales porque afectan a todas las maniobras son cuatro: sustentación, peso, empuje y resistencia. Estas cuatro fuerzas actúan en pares; la sustentación es opuesta al peso, y el empuje o tracción a la resistencia.

Un aeroplano, como cualquier otro objeto, se mantiene estático en el suelo debido a la acción de dos fuerzas: su peso, debido a la gravedad, que lo mantiene en el suelo, y la inercia o resistencia al avance que lo mantiene parado. Para que este aeroplano vuele será necesario contrarrestar el efecto de estas dos fuerzas negativas, peso y resistencia, mediante otras dos fuerzas positivas de sentido contrario, sustentación y empuje respectivamente. Así, el empuje ha de superar la resistencia que opone el avión a avanzar, y la sustentación superar el peso del avión manteniéndolo en el aire.

Fig.1.3.1 - Fuerzas que actuan en vuelo.

1.3.1 Sustentación.

Es la fuerza desarrollada por un perfil aerodinámico moviéndose en el aire, ejercida de abajo arriba, y cuya dirección es perpendicular al viento relativo y a la envergadura del avión (no necesariamente perpendiculares al horizonte). Se suele representar con la letra **L,** inicial del término inglés Lift = Sustentación.

Fig.1.3.2 - Perpendicularidad de la sustentación.

Anteriormente hemos visto las leyes aerodinámicas que explican la sustentación; ahora veremos con detalle cuales son los factores que afectan a la misma, dando entrada de paso a algunos conceptos nuevos.

Actitud del avión. Este término se refiere a la orientación o referencia angular de los ejes longitudinal y transversal del avión con respecto al horizonte, y se especifica en términos de: posición de morro (pitch) y posición de las alas (bank); p.ejemplo: el avión esta volando con 5º de morro arriba y 15º de alabeo a la izquierda.

Trayectoria de vuelo. Es la dirección seguida por el perfil aerodinámico durante su desplazamiento en el aire; es decir es la trayectoria que siguen las alas y por tanto el avión.

Viento relativo. Es el flujo de aire que produce el avión al desplazarse. El viento relativo es paralelo a la trayectoria de vuelo y de dirección opuesta. Su velocidad es la relativa del avión con respecto a la velocidad de la masa de aire en que este se mueve.(1)

Fig.1.3.3 - Trayectoria de vuelo y viento relativo.

Es importante destacar que no debe asociarse la trayectoria de vuelo, ni por tanto el viento relativo, con la actitud de morro del avión; por ejemplo, una trayectoria de vuelo recto y nivelado puede llevar aparejada una actitud de morro ligeramente elevada.

Ángulo de incidencia. El ángulo de incidencia es el ángulo agudo formado por la cuerda del ala con respecto al eje longitudinal del avión. Este ángulo es fijo, pues responde a consideraciones de diseño y no es modificable por el piloto.(2)(3)

Fig.1.3.4 - Angulo de incidencia.

Ángulo de ataque. El ángulo de ataque es el ángulo agudo formado por la cuerda del ala y la dirección del viento relativo. Este ángulo es variable, pues depende de la dirección del viento relativo y de la posición de las alas con respecto a este, ambos extremos controlados por el piloto. Es conveniente tener muy claro el concepto de ángulo de ataque pues el vuelo está directa y estrechamente relacionado con el mismo.

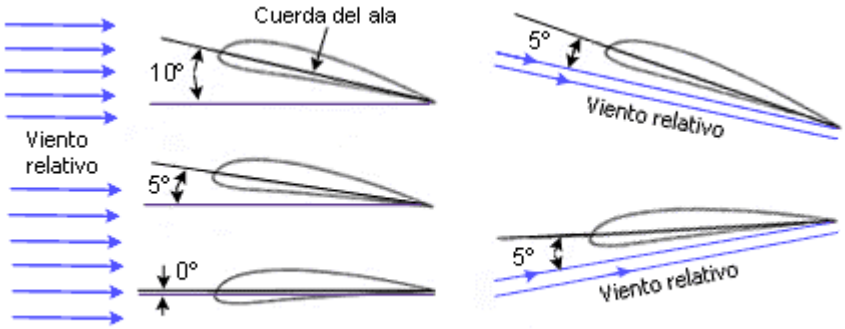

Fig.1.3.5 - Angulo de ataque y viento relativo.

Es importante notar que, tal como muestra la fig.1.3.5, el ángulo de ataque se mide respecto al viento relativo y no respecto de la línea del horizonte. Dada la importancia de este concepto, se profundiza en el mismo en el capítulo 1.7.

En la fig.1.3.6 se muestran distintas fases de un avión en vuelo, en cada una de las cuales podemos apreciar de una manera gráfica los conceptos definidos: la trayectoria; el viento relativo, paralelo y de dirección opuesta a la trayectoria, y la sustentación, perpendicular al viento relativo.

Fig.1.3.6 - La sustentación es perpendicular al viento relativo.

1.3.2 Factores que afectan a la sustentación.

La forma del perfil del ala. Hasta cierto límite, a mayor curvatura del perfil mayor diferencia de velocidad entre las superficies superior e inferior del ala y por tanto mayor diferencia de presión, o lo que es igual mayor fuerza de sustentación. No obstante no hay que confundirse pensando que es necesario que el ala sea curvada por arriba y plana o cóncava por abajo para producir sustentación, pues un ala con un perfil simétrico también la produce. Lo que ocurre es que un ala ligeramente curvada entra en pérdida con un ángulo de ataque mucho mayor que un ala simétrica, lo que significa que tanto su coeficiente de sustentación como su resistencia a la pérdida son mayores.

La curvatura de un ala típica moderna es solo de un 1% o un 2%. La razón por la cual no se hace más curvada, es que un incremento de esta curvatura requeriría una superficie inferior cóncava, lo cual ofrece dificultades de construcción. Otra razón, es que una gran curvatura solo es realmente beneficiosa en velocidades cercanas a la pérdida (despegue y aterrizaje), y para tener más sustentación en esos momentos es suficiente con extender los flaps.

La superficie alar. Cuanto más grandes sean las alas mayor será la superficie sobre la que se ejerce la fuerza de sustentación. Pero hay que tener en cuenta que perfiles muy curvados o alas muy grandes incrementan la resistencia del avión al ofrecer mayor superficie enfrentada a la corriente de aire. En cualquier caso, tanto la forma como la superficie del ala dependen del criterio del diseñador, que tendrá que adoptar un compromiso entre todos los factores según convenga a la funcionalidad del avión.

La densidad del aire. Cuanto mayor sea la densidad del aire, mayor es el número de partículas por unidad de volumen que cambian velocidad por presión y producen sustentación (factor **d** del teorema de Bernoulli).

La velocidad del viento relativo. A mayor velocidad sobre el perfil, mayor es la sustentación. La sustentación es proporcional al cuadrado de la velocidad (factor $\mathbf{v^2}$ del teorema de Bernoulli), siendo por tanto este factor el que comparativamente más afecta a la sustentación.

El ángulo de ataque. Si se aumenta el ángulo de ataque es como si se aumentara la curvatura de la parte superior del perfil, o sea el estrechamiento al flujo de aire, y por tanto la diferencia de presiones y en consecuencia la sustentación. No obstante como se verá más adelante, un excesivo ángulo de ataque puede provocar la entrada en pérdida.
En la fig.1.3.7 se ve de forma general como aumenta el coeficiente de sustentación (CL) con el ángulo de ataque hasta llegar al CL máximo, a partir del cual la sustentación disminuye con el ángulo de ataque. Los valores y la forma de la curva en la gráfica dependerán de cada perfil concreto.

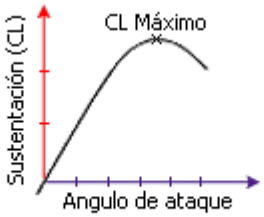

Fig.1.3.7 - Coeficiente de sustentación vs. Angulo de ataque.

En resumen, la sustentación creada por el ala está en función de:

- El coeficiente aerodinámico (Forma del perfil).
- La superficie alar.
- La densidad del aire.
- La velocidad del viento relativo.
- El ángulo de ataque.

La fórmula correspondiente sería: **L=CL*q*S** donde **CL** es el coeficiente de sustentación, dependiente del tipo de perfil y del ángulo de ataque; **q** la presión aerodinámica (*1/2dv²* siendo *d* la densidad y *v* la velocidad del viento relativo) y **S** la superficie alar.

Es obvio que el piloto solo puede tener influencia en la sustentación actuando sobre los factores velocidad y ángulo de ataque, pues el coeficiente aerodinámico y la superficie alar están predeterminadas por el diseño del avión, y la densidad del aire depende del estado de la atmósfera.
Más adelante se verá que el avión dispone de dispositivos hipersustentadores (flaps y slats) que accionados por el piloto modifican la curvatura del ala y la superficie alar, pero estos dispositivos están diseñados para posibilitar maniobras a baja velocidad (aterrizaje, despegue, etc.) más que para aumentar la sustentación a velocidades normales de operación.

1.3.3 Centro de Presiones.

Se denomina centro de presiones al punto teórico del ala donde se considera aplicada toda la fuerza de sustentación. La figura 1.3.8 muestra un ejemplo de distribución de presiones sobre un perfil moviendose en el aire. A efectos teóricos, aunque la presión actúa sobre todo el perfil, se considera que toda la fuerza de sustentación se ejerce sobre un punto en la línea de la cuerda (resultante).

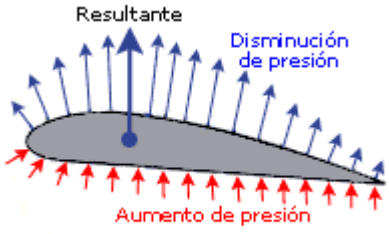

Fig.1.3.8 - Centro aerodinámico.

La posición del centro de presiones se suele dar en % de la cuerda del ala a partir del borde de ataque.

A medida que aumenta o disminuye el ángulo de ataque se modifica la distribución de presiones alrededor del perfil, desplazandose el centro de presiones, dentro de unos límites, hacia adelante o atrás respectivamente.
El margen de desplazamiento suele estar entre el 25% y el 60% de la cuerda, y puesto que afecta a la estabilidad de la aeronave es conveniente que sea el menor posible.

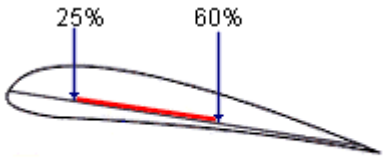

Fig.1.3.9 - Límites de desplazamiento del centro aerodinámico.

Mediante métodos empíricos se ha demostrado que a medida que se incrementa el ángulo de ataque, el Centro de Presiones se desplaza gradualmente hacia adelante. En un punto más allá del ángulo de ataque para vuelo ordinario, comienza a moverse hacia atrás de nuevo; cuando llega a un punto lo suficientemente atrás, el morro del avión cae porque el ala está en pérdida.

1.3.4 Peso.

El peso es la fuerza de atracción gravitatoria sobre un cuerpo, siendo su dirección perpendicular a la superficie de la tierra, su sentido hacia abajo, y su intensidad proporcional a la masa de dicho cuerpo. Esta fuerza es la que atrae al avión hacia la tierra y ha de ser contrarrestada por la fuerza de sustentación para mantener al avión en el aire.

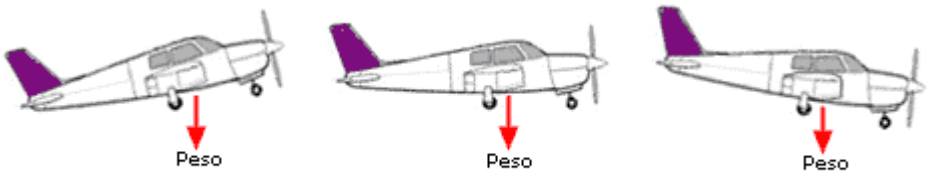

Fig.1.3.10 - Dirección y sentido del peso.

Dependiendo de sus características, cada avión tiene un peso máximo que no debe ser sobrepasado, estudiandose en un capitulo posterior como debe efectuarse la carga de un avión para no exceder sus limitaciones.

1.3.5 Centro de Gravedad.

Es el punto donde se considera ejercida toda la fuerza de gravedad, es decir el peso. El C.G es el punto de balance de manera que si se pudiera colgar el avión por ese punto específico este quedaría en perfecto equilibrio. El avión realiza todos sus movimientos pivotando sobre el C.G.

La situación del centro de gravedad respecto al centro de presiones tiene una importancia enorme en la estabilidad y controlabilidad del avión (Ver 1.6.5).

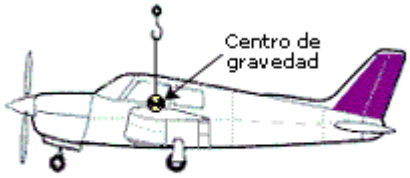

Fig.1.3.11 - Centro de gravedad

1.3.6 Resistencia.

La resistencia es la fuerza que impide o retarda el movimiento de un aeroplano. La resistencia actúa de forma paralela y en la misma dirección que el viento relativo, aunque también podríamos afirmar que la resistencia es paralela y de dirección opuesta a la trayectoria.

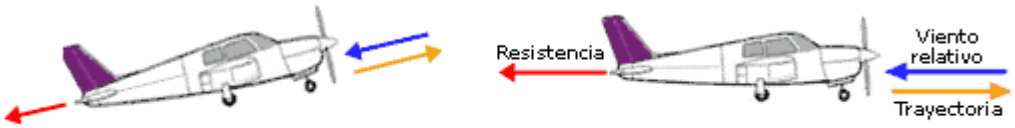

Fig.1.3.12 - Dirección y sentido de la resistencia.

Desde un punto de vista aerodinámico, cuando un ala se desplaza a través del aire hay dos tipos de resistencia: (a) resistencia debida a la fricción del aire sobre la superficie del ala, y (b) resistencia por la presión del propio aire oponiéndose al movimiento de un objeto en su seno. La resistencia por fricción es proporcional a la viscosidad, que en el aire es muy baja, de manera que la mayoría de las veces esta resistencia es pequeña comparada con la producida por la presión, mientras que la resistencia debida a la presión depende de la densidad de la masa de aire.
Ambas resistencias crean una fuerza proporcional al área sobre la que actúan y al cuadrado de la velocidad. Una parte de la resistencia por presión que produce un ala depende de la cantidad de sustentación producida; a esta parte se le denomina resistencia inducida, denominandose resistencia parásita a la suma del resto de resistencias.

La fórmula de la resistencia (en ingles "drag") tiene la misma forma que la de la sustentación: **D=CD*q*S** donde **CD** es el coeficiente de resistencia, dependiente del tipo de perfil y del ángulo de ataque; **q** la presión aerodinámica (*1/2dv²* siendo *d* la densidad y *v* la velocidad del viento relativo) y **S** la superficie alar.

La resistencia total del avión es pues la suma de dos tipos de resistencia: la resistencia inducida y la resistencia parásita.

Resistencia inducida. La resistencia inducida, indeseada pero inevitable, es un producto de la sustentación, y se incrementa en proporción directa al incremento del ángulo de ataque. Al encontrarse en la parte posterior del ala la corriente de aire que fluye por arriba con la que fluye por debajo, la mayor velocidad de la primera deflecta hacia abajo a la segunda haciendo variar ligeramente el viento relativo, y este efecto crea una resistencia. Este efecto es más acusado en el extremo del ala, pues el aire que fluye por debajo encuentra una vía de escape hacia arriba donde hay menor presión, pero la mayor velocidad del aire fluyendo por arriba deflecta esa corriente hacia abajo produciéndose resistencia adicional. Este movimiento de remolino crea vórtices que absorben energía del avión.

Fig.1.3.13 - Deflexión del flujo de aire.

Representadas de forma gráfica la sustentación y la resistencia, la fuerza aerodinámica se descompone en dos fuerzas: una aprovechable de sustentación y otra no deseada pero inevitable de resistencia (fig.1.3.14).

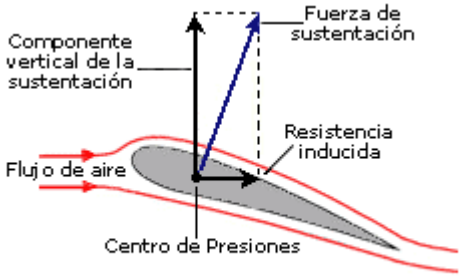

Fig.1.3.14 - Resistencia inducida.

De la explicación dada se deduce claramente que la resistencia inducida aumenta a medida que aumenta el ángulo de ataque. Pero si para mantener la misma sustentación ponemos más velocidad y menos ángulo de ataque, la resistencia inducida será menor, de lo cual deducimos que la resistencia inducida disminuye con el aumento de velocidad. La figura 1.3.15 nos muestra la relación entre la resistencia inducida, la velocidad, y el ángulo de ataque.

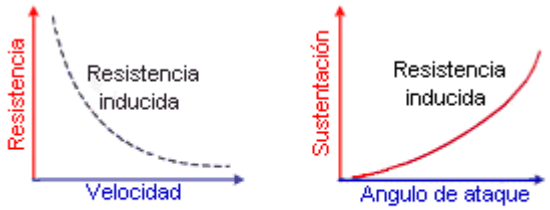

Fig.1.3.15 - Variación de la resistencia inducida con la velocidad y el ángulo de ataque.

En la resistencia inducida también tiene influencia la forma de las alas; un ala alargada y estrecha tiene menos resistencia inducida que un ala corta y ancha. (fig.1.4.2)

Resistencia parásita. Es la producida por las demás resistencias no relacionadas con la sustentación, como son: resistencia al avance de las partes del avión que sobresalen (fuselaje, tren de aterrizaje no retráctil, antenas de radio, etc.); entorpecimiento del flujo del aire en alas sucias por impacto de insectos o con formación de hielo; rozamiento o fricción superficial con el aire; interferencia del flujo de aire a lo largo del fuselaje con el flujo de las alas; el flujo de aire canalizado al compartimento del motor para refrigerarlo (que puede suponer en algunos aeroplanos cerca del 30% de la resistencia total); etc... También, la superficie total del ala y la forma de esta superficie afecta a la resistencia parásita; un ala más alargada presenta mayor superficie al viento, y por ello mayor resistencia parásita, que un ala más corta. Lógicamente, cuanto mayor sea la velocidad, mayor será el efecto de la resistencia parásita. La resistencia parásita aumenta con la velocidad.

Fig.1.3.16 - Resistencia parásita vs. Velocidad.

Si la resistencia inducida es un producto de la sustentación, y en la resistencia parásita tienen influencia la superficie alar y la forma del ala, es obvio que prácticamente todos los factores que afectan a la sustentación afectan en mayor o menor medida a la resistencia.

1.3.7 Control del piloto sobre la resistencia.

La resistencia inducida depende del ángulo de ataque. Por lo tanto el piloto puede reducir la resistencia inducida si para lograr más sustentación incrementa la velocidad en vez de incrementar el ángulo de ataque. A mayor velocidad menor resistencia inducida. (fig.1.3.15) El peso influye de forma indirecta en esta resistencia, puesto que a más peso más sustentación se necesita y por tanto mayor ángulo de ataque para mantener la misma velocidad. Disminuyendo el peso disminuye la resistencia inducida.

Por el contrario, la resistencia parásita se incrementa con la velocidad del avión (fig.1.3.16). La única forma que tiene el piloto para disminuirla es aminorar la velocidad, por que en lo demás, esta resistencia depende sobre todo del diseño del avión y el piloto no dispone apenas de capacidad de acción para modificarla (mantener las alas limpias, impedir la formación de hielo en las mismas, ...).

Si con el aumento de velocidad disminuye la resistencia inducida y se incrementa la resistencia parásita, tiene que haber un punto en que la suma de ambas (resistencia total) sea el menor posible. Este punto de velocidad viene tabulado por el fabricante en el manual del avión.

Fig.1.3.17 - Resistencia total

A baja velocidad la mayoría de la resistencia es inducida, debido al incremento del ángulo de ataque para producir suficiente sustentación para soportar el peso del avión. A medida que la velocidad sigue bajando, la resistencia inducida se incrementa rápidamente y la resistencia parásita apenas tiene influencia.
Por el contrario, a alta velocidad la resistencia parásita es la dominante mientras que la inducida es irrelevante.

Resumiendo:

- A mayor velocidad menor resistencia inducida.
- A mayor ángulo de ataque mayor resistencia inducida.
- A mayor velocidad mayor resistencia parásita.

1.3.8 Empuje o tracción.

Para vencer la inercia del avión parado, acelerarlo en la carrera de despegue o en vuelo, mantener una tasa de ascenso adecuada, vencer la resistencia al avance, etc... se necesita una fuerza: el empuje o tracción.
Esta fuerza se obtiene acelerando una masa de aire a una velocidad mayor que la del aeroplano. La reacción, de igual intensidad pero de sentido opuesto (3ª ley del movimiento de Newton), mueve el avión hacia adelante. En aviones de hélice, la fuerza de propulsión la genera la rotación de la hélice, movida por el motor (convencional o turbina); en reactores, la propulsión se logra por la expulsión violenta de los gases quemados por la turbina.

Esta fuerza se ejerce en la misma dirección a la que apunta el eje del sistema propulsor, que suele ser más o menos paralela al eje longitudinal del avión.

Fig.1.3.18 - Dirección y sentido de empuje.

Es obvio que el factor principal que influye en esta fuerza es la potencia del motor, pero hay otros elementos que también influyen como pueden ser la forma y tamaño de la hélice, octanaje del combustible, densidad del aire, etc. Se habla de potencia en C.V. en motores convencionales, y de kilos o libras de empuje en reactores.

Puesto que potencia es equivalente a energía por unidad de tiempo, a mayor potencia mayor capacidad de aceleración.

La potencia es el factor más importante a la hora de determinar la tasa de ascenso de un avión. De hecho la tasa máxima de ascenso de un avión no está relacionada con la sustentación sino con la potencia disponible descontada la necesaria para mantener un vuelo nivelado.

Notas:

Estas cuatro fuerzas están definidas respecto a tres sistemas de coordenadas diferentes: la sustentación y la resistencia están definidas en relación al viento relativo; el peso (gravedad) respecto al centro de la tierra, y el empuje con respecto a la orientación del aeroplano. Esta situación puede verse un poco más complicada porque por ejemplo el empuje y la resistencia tienen componentes verticales que se oponen al peso, mientras la sustentación tiene un componente horizontal.

Se puede pensar que las cuatro fuerzas están definidas de una manera anárquica, pero los conceptos y sus definiciones son los que son y además son correctos. Hay mucha historia e investigación sobre ellos, y son muy importantes al analizar situaciones complejas.

Pero no hay que alarmarse, dado que estos conceptos tienen una importancia relativa. En vuelo ordinario (no acrobático) exceptuando los giros, incluso en ascensos y descensos, los ángulos son generalmente pequeños, de manera que el empuje es aproximadamente horizontal, y los vientos relativos difieren de la horizontal solo en unos pocos grados, de forma que la resistencia es aproximadamente horizontal y la sustentación cercana a la vertical.

Simplificando: en vuelo recto y nivelado a velocidad constante las fuerzas que actúan hacia abajo se compensan con las que actúan hacia arriba, y las que actúan hacia delante se equilibran con las que actúan hacia atrás. Esto es cierto, se calculen como se calculen las contribuciones individuales de la sustentación, el peso, la resistencia y el empuje. Si una de estas fuerzas básicas cambia de magnitud haciendose mayor que la opuesta, el avión se moverá en la dirección de la fuerza mayor hasta un punto en que ambas estén de nuevo en equilibrio.

Por supuesto que la manera en que las fuerzas se compensan se refiere a un avión en vuelo; puede haber otros sistemas en que las fuerzas se compensen de forma diferente: por ejemplo, el peso de un avión de despegue vertical durante la maniobra de toma de tierra no convencional, se compensa con el empuje del motor.

Pequeñas paradojas: En un ascenso a baja velocidad y mucha potencia la sustentación es menor que el peso pero el empuje soporta parte de dicho peso. Suena raro ¿verdad? pero es técnicamente cierto. En un descenso a alta velocidad y baja potencia, la sustentación de nuevo es menor que el peso, pero en este caso la resistencia está soportando parte del peso. Estas paradojas son puros tecnicismos consecuencia de las definiciones de las cuatro fuerzas, pero no tienen ningún impacto en la técnica de pilotaje.

Sumario:

- Las cuatro fuerzas que actúan en vuelo son sustentación, peso, empuje y resistencia. Sustentación y empuje son favorables y opuestas a las desfavorables peso y resistencia.
- Generalizando, sustentación y peso son de componente vertical en tanto empuje y resistencia son de componente horizontal.
- La sustentación es perpendicular al viento relativo.
- Aunque la sustentación depende de varios factores, los primordiales son ángulo de ataque y velocidad.
- El coeficiente de sustentación es proporcional al ángulo de ataque hasta el CL máximo a partir del cual comienza a disminuir.
- Teóricamente, el centro de presiones es el punto del ala donde se supone ejercida la sustentación, y el centro de gravedad es el punto donde se concentra todo el peso del avión. La posición de uno respecto del otro tiene una gran importancia según veremos en capítulos posteriores.
- El peso es siempre perpendicular al centro de la Tierra.

- La resistencia es paralela y de la misma dirección que el viento relativo. Asimismo es paralela y de dirección opuesta a la trayectoria.
- La resistencia inducida es directamente proporcional al ángulo de ataque e inversamente proporcional a la velocidad.
- La resistencia parásita es directamente proporcional a la velocidad.
- La tracción o empuje se ejerce en la misma dirección que el eje de propulsión.
- Potencia es energía por unidad de tiempo; a mayor potencia mayor capacidad de aceleración.
- La tasa de ascenso depende de la potencia disponible descontada la necesaria para mantener un vuelo nivelado.

© M.A.Muñoz Sep/2000

---

(1). En el apartado dedicado a la resistencia (1.3.6) se verá que debido a la resistencia inducida no es exactamente paralelo.

(2). La extensión de flaps por el piloto produce un cambio en la curvatura del ala y por añadidura en el ángulo de incidencia.

(3). Algunos aviones militares montan alas que permiten variar el ángulo de incidencia: alas de incidencia variable.